

# Evaluación de modelos para estimar la erosividad de la lluvia en el Valle del Cauca, Colombia

## Evaluation of models to estimate rainfall erosivity in Valle del Cauca, Colombia

Daniela Calero Mosquera <sup>1,2</sup>, Carolina Martínez López <sup>1,3</sup>, Juan Carlos Menjívar Flores <sup>1,4</sup>.

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira. <sup>2</sup>✉ [dcalerom@unal.edu.co](mailto:dcalerom@unal.edu.co), <sup>3</sup>✉ [camartinezlo@unal.edu.co](mailto:camartinezlo@unal.edu.co), <sup>4</sup>✉ [jcmenjivarf@unal.edu.co](mailto:jcmenjivarf@unal.edu.co)



<https://doi.org/10.15446/acag.v70n2.95115>

2021 | 70-2 p 198-210 | ISSN 0120-2812 | e-ISSN 2323-0118 | Rec.: 15-04-2021. Acep.: 17-10-2021

### Resumen

La erosividad de la lluvia (R) es uno de los factores incluidos en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) y se define como la capacidad potencial de la lluvia para erosionar los suelos, cuyo conocimiento es fundamental en la planificación del uso y manejo de los mismos. En el presente trabajo se evaluaron dos métodos (USLE- $EI_{30}$  y  $EI_{30cor}$ ) para determinar el factor R en los principales municipios productores de piña del Valle del Cauca, además, se analizaron los índices de Fournier (IF) y Modificado de Fournier (IMF); para esto, se utilizaron los registros de precipitación de 12 estaciones pluviográficas, pluviométricas y climatológicas pertenecientes al área de estudio, durante los años 2015-2019, teniendo en cuenta la disponibilidad de los datos. Se encontró que el 66 % de las precipitaciones anuales y el 69 % de los eventos erosivos se presentan en los meses de marzo a mayo y septiembre a noviembre, respondiendo al régimen bimodal. Respecto al factor USLE- $EI_{30}$ , se encontraron valores entre 636.7 y 4384.0 MJ.mm.ha<sup>-1</sup>, mientras que con el  $EI_{30cor}$  los valores oscilaron entre 2850.5 y 11110.7 MJ.mm.ha<sup>-1</sup>. El análisis de la regresión lineal entre los índices de erosividad y la precipitación media anual evidenció un R<sup>2</sup> mayor para el caso del IMF (0.976). Finalmente, el USLE- $EI_{30}$  se correlacionó significativamente con el IMF anual (R<sup>2</sup> = 0.89), generando el modelo ajustado ( $EI_{30} = 20.979$  (IFM) - 389.04; r = 0.95); además, se evidenció que más del 70 % del área de estudio presenta erosividad muy baja (1000 - 2500 MJ.mm.ha<sup>-1</sup>).

**Palabras claves:**  $EI_{30cor}$ , erosión hídrica, erosividad, piña, USLE- $EI_{30}$ .

### Abstract

Rainfall erosivity (R) is one of the factors included in the Universal Soil Loss Equation (USLE) and it is defined as the potential capacity of the rain to erode soils, which knowledge is essential in planning the use and handling them. In the work, two methods (USLE- $EI_{30}$  and  $EI_{30cor}$ ) were evaluated to determine the R factor in the main pineapple producing municipalities of Valle del Cauca, in addition, the Fournier (IF) and Modified Fournier (IMF) indices were analyzed; for this, the precipitation records of 12 pluviographic, pluviometric, and climatological stations belonging to the study area were used, during the years 2015-2019, taking into account the availability of the data. It was found that 66 % of the annual rainfall and 69 % of the erosive events occur in the months of March to May and September to November, responding to the bimodal regime. Regarding the USLE- $EI_{30}$ , values between 636.7 and 4384.0 MJ.mm.ha<sup>-1</sup> were found, while with the  $EI_{30cor}$  the values ranged between 2850.5 and 11110.7 MJ.mm.ha<sup>-1</sup>. The analysis of the linear regression between the erosivity indices and the mean annual precipitation showed a higher R<sup>2</sup> for the case of the IMF (0.976). Finally, the USLE- $EI_{30}$  was significantly correlated with the annual IMF (R<sup>2</sup> = 0.89), generating the adjusted model ( $EI_{30} = 20.979$  (IFM) - 389.04; r = 0.95); furthermore, it was evidenced that more than 70 % of the study area presents very low erosivity (1000-2500 MJ.mm.ha<sup>-1</sup>).

**Keywords:**  $EI_{30cor}$ , erosivity, pineapple, USLE- $EI_{30}$ , water erosion.

## Introducción

La erosión del suelo es una de las problemáticas ambientales más graves y generalizadas a nivel mundial (Kaiser *et al.*, 2018; Xu *et al.*, 2019; Guo *et al.*, 2021), es un proceso de degradación que se caracteriza por ser lento, recurrente, progresivo y, en muchos casos, irreversible (Castelan Vega *et al.*, 2014; Kumarasinghe, 2021), considerando que sus impactos sobre la calidad del suelo son acumulativos y van en incremento (Benaud *et al.*, 2020).

Existen muchos factores que contribuyen a la erosión del suelo, tales como el viento, la lluvia, la gravedad, la deforestación, el sobrepastoreo, entre otros (Bi *et al.*, 2014; Evans y Boardman, 2016; Poesen, 2018), sin embargo, se considera que el agua es uno de los más importantes agentes que contribuyen a la disgregación del suelo (Chen *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2020). En este sentido, la erosividad de la lluvia es un factor empleado como indicador de dicho potencial, y es utilizado ampliamente para la evaluación de la variabilidad espacial y temporal de la erosión del suelo, generada por las precipitaciones (impacto hidráulico de las gotas de agua) (Qin *et al.*, 2016; Shin *et al.*, 2019).

El conocimiento de la agresividad de la lluvia es uno de los aspectos fundamentales para la zonificación y planificación del uso y manejo de los suelos (Ramírez-Ortiz *et al.*, 2007). De este modo, el factor R es un criterio que permite conocer si existen las condiciones para el desarrollo adecuado de los cultivos, considerando el riesgo de erosión del suelo bajo los futuros usos de la tierra y los efectos del cambio climático (Shi *et al.*, 2021). Así mismo, favorece la toma de decisiones para la sostenibilidad y la conservación del recurso suelo (Kraemer *et al.*, 2018, Pereira *et al.*, 2020).

Para determinar el factor R, se requieren registros de precipitación durante varios años (Panagos *et al.*, 2016; Rutebuka *et al.*, 2020), así como un buen nivel de detalle y muy bajo porcentaje de datos faltantes, de tal manera que permitan observar las variaciones de intensidad durante cada evento (Bezak *et al.*, 2020). Sin embargo, en muchos países la disponibilidad de esa información es escasa, como ocurre en el caso de Colombia, motivo por el cual se han desarrollado métodos alternativos para definir el R de una manera simple y aplicable a condiciones regionales, donde se incluyen los índices de Fournier (IF) y Modificado de Fournier (IMF) (Ramírez-Ortiz *et al.*, 2007; Castelan Vega *et al.*, 2014; Kraemer *et al.*, 2018).

El IF fue propuesto por Fournier (1960) y es usado ampliamente por su facilidad de obtención (Méndez *et al.*, 2020), sin embargo, no tiene muchos seguidores entre los científicos del suelo, ya que este solo considera el mes con mayor registro de precipitación en el año (Echeverri y Obando, 2010; Mohtar *et al.*, 2015), descartando los valores del resto de los meses (Jordán y Bellinfante, 2000). En Colombia ha sido

utilizado principalmente para estudios en la región andina central como los desarrollados por Gómez (1975; 1991).

Por su parte, el IMF desarrollado por Arnoldus (1977), se basa en la sumatoria de las precipitaciones mensuales con relación a la precipitación total del año correspondiente (Arnoldus, 1980; Fernández *et al.*, 2020) y se fundamenta en el hecho de que no solo el mes de mayor precipitación produce erosión superficial, sino que hay meses con menores cantidades de precipitación que también producen erosión, por lo que ha sido más aceptado, especialmente para zonas tropicales (Hoyos *et al.*, 2005).

En Colombia, el 48 % de los suelos son propensos a la erosión (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM] *et al.*, 2015) y un 97 % de esta es causada por la lluvia (Ramírez e Hincapié, 2009); a nivel local, se han adelantado estudios sobre la erosividad de la lluvia, principalmente en la zona cafetera de la región andina, donde Ramírez-Ortiz *et al.* (2007), correlacionaron el método tradicional propuesto por la USLE (USLE- $EI_{30}$ ) y el IMF, desarrollando el modelo  $EI_{30cor}$ , el cual ha sido utilizado por investigadores como Echeverri y Obando (2010), Castro-Quintero *et al.* (2017).

No obstante, estos estudios a nivel del Valle del Cauca son escasos, a pesar de tratarse de uno de los departamentos más afectados, en términos de la severidad de la erosión del suelo (IDEAM *et al.*, 2015). En esta región se han evidenciado intensos procesos de erosión hídrica, incremento de superficies cultivadas, fuertes pendientes e inadecuadas prácticas de manejo y conservación del suelo, esto último, como consecuencia de las actividades piñícolas que se desarrollan en el sector, principalmente, en los municipios Dagua, Restrepo, La Cumbre y Vijes.

Teniendo en cuenta lo anterior, y considerando que la erosividad es uno de los factores más importantes que influyen en la erosión del suelo (Moore, 1979; Guo *et al.*, 2019; Rutebuka *et al.*, 2020), la presente investigación tuvo como propósito evaluar modelos para estimar la erosividad de la lluvia en suelos dedicados al cultivo de piña, en el departamento del Valle del Cauca, Colombia. El estudio permite conocer el comportamiento de esta variable, zonificarla y así mismo que funcione como una herramienta para la toma de decisiones a futuro en términos de la adecuada planificación y el manejo del recurso suelo en la región.

## Materiales y métodos

Con el propósito de realizar la evaluación de modelos para estimar la erosividad de la lluvia en el departamento del Valle del Cauca, Colombia, se elaboró un flujograma del procedimiento metodológico (ver Figura 1).

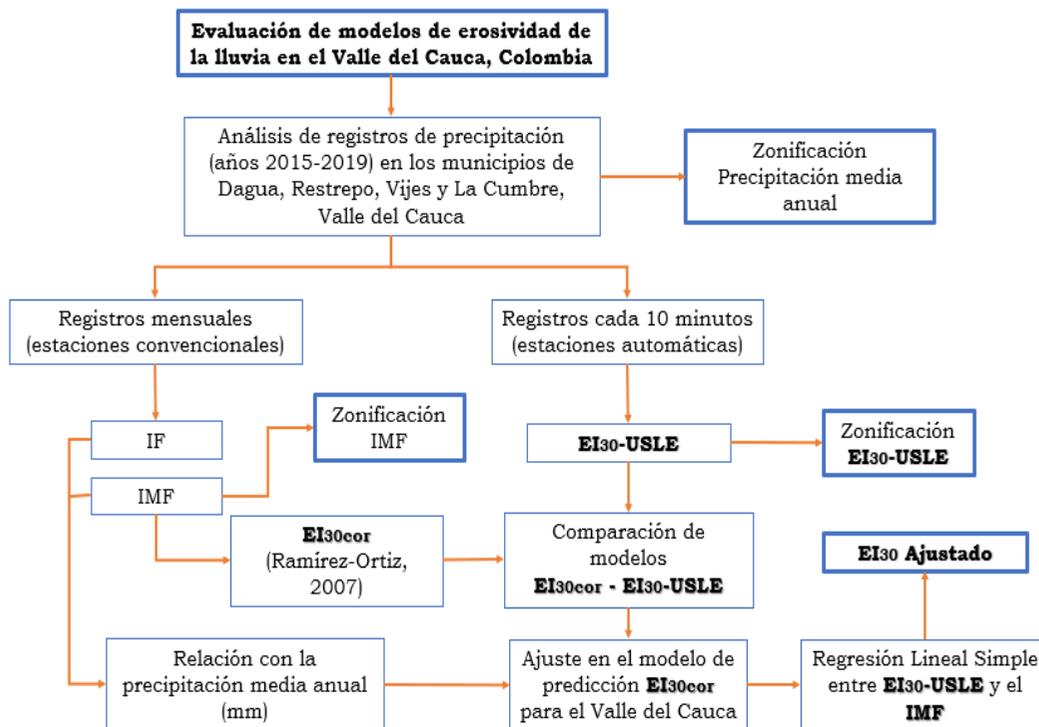


Figura 1. Flujograma del procedimiento metodológico de la investigación

Área de estudio. El área de estudio está comprendida entre los  $3^{\circ}52'51.6''$  a  $3^{\circ}23'56.4''$  de latitud Norte y los  $76^{\circ}33'57.6''$  a  $76^{\circ}42'7.199''$  de longitud Oeste, con una superficie aproximada de 138477.15 ha, un rango de altitudes entre 205 y 3180 m s.n.m., y una precipitación media anual que varía entre 600 a 2800 mm.

De acuerdo con Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) (2014), los principales órdenes de suelos que abarca la región en términos de porcentaje de área son los Inceptisoles (65 %), seguidos de los Molisoles (11 %), Andisoles (5 %), Entisoles (4 %) y Alfisoles (2 %), y las geologías más predominantes son las lateritas; así mismo, las coberturas más representativas son bosque mixto denso alto de tierra firme y pastos cultivados, que representan el 22.2 % y el 19.7 % del área total, respectivamente. Sin embargo, en lo que respecta a cultivos agrícolas, el predominante es la piña, que abarca el 1.92 % del área, seguido por café, plátano, caña panelera y tomate, cultivos que constituyen el 1.62 % del área total.

Las pendientes se encuentran principalmente entre 12-25 % y 25-50 %, caracterizándose por ser terrenos fuertemente inclinados a ligeramente escarpados, rangos que corresponden al 35.41 % y 29.11 % del área de estudio, respectivamente.

Por otra parte, el área está circunscrita a la cuenca hidrográfica del río Dagua, la cual se constituye como la fuente de agua más importante para el ecosistema

del Valle del Cauca (Aguirre et al., 2017). Esta región posee más de ocho zonas de vida, lo que representa un enorme valor ambiental (Loaiza et al., 2014).

Desde el punto de vista político-territorial, el área de estudio pertenece a la jurisdicción de los municipios de Dagua, Restrepo, Vijes y La Cumbre, teniendo en cuenta que son los municipios que registran mayor producción y área sembrada en piña en el departamento del Valle del Cauca. La Figura 2 presenta la localización del área de estudio.

**Registros de precipitación.** Se analizaron registros de precipitación de estaciones pluviométricas, pluviográficas y climatológicas, disponibles en la región, de las cuales, cuatro estaciones son pluviométricas-convencionales (con registros diarios) y 12 estaciones son pluviográficas y climatológicas-automáticas (con registros cada 10 minutos). Se recopilaron y sistematizaron los datos correspondientes a un período de cinco años, teniendo en cuenta la disponibilidad de la información y la fecha de inicio de cada estación. La información fue suministrada por la CVC.

**Factor R: USLE-EI<sub>30</sub>.** El factor USLE-EI<sub>30</sub> fue calculado con la metodología propuesta en la USLE por Wischmeier y Smith (1978), para esto, se utilizaron los registros de estaciones automáticas (con registros cada 10 minutos) y se analizaron eventos de precipitación con una duración mayor o igual a 12.7 mm, separados por al menos seis horas (eventos erosivos), siguiendo la metodología USLE;

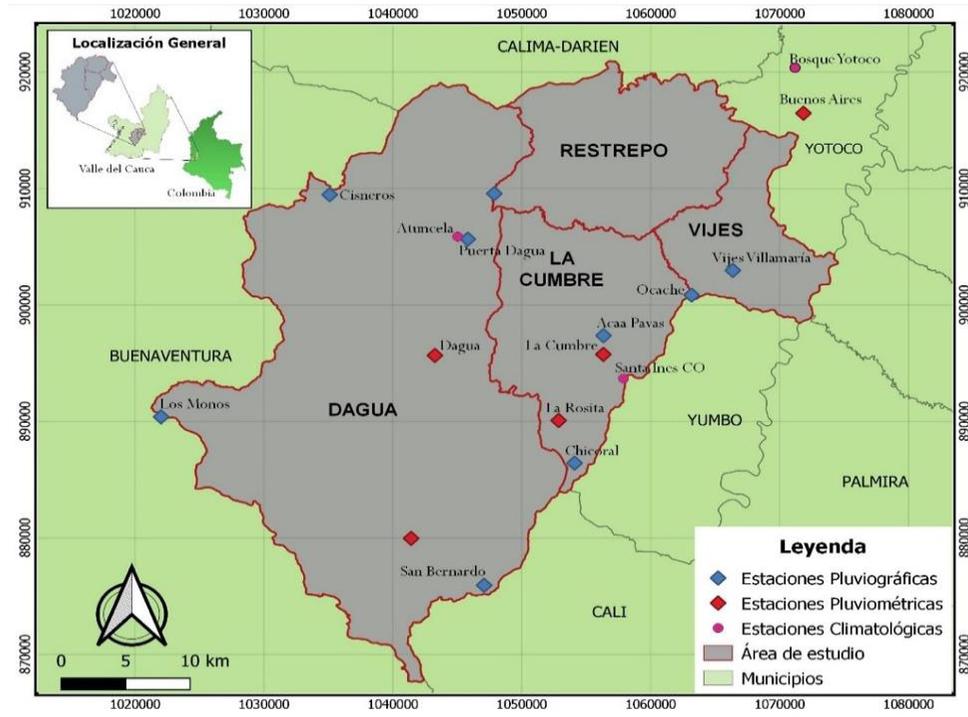


Figura 2. Localización de los cuatro municipios correspondientes al área de estudio.

sin embargo, teniendo en cuenta que en este caso no se encuentran disponibles los registros de la banda pluviográfica, sino la precipitación acumulada en 10 minutos, se propuso utilizar este intervalo para determinar la intensidad de precipitación (IM) requerida en el cálculo de la energía cinética por cada mm de lluvia.

$$e = 0.119 + 0.0873 \cdot \log IM \quad \text{Ec. 1} \spadesuit$$

Una vez se obtuvo la energía total en cada intervalo de 10 minutos, se multiplicó el valor de e por la precipitación registrada en dicho intervalo.

$$E_i = e \cdot Pt \quad \text{Ec. 2}$$

Para obtener la energía cinética total del evento seleccionado (E) se sumaron las energías obtenidas para cada intervalo de 10 minutos.

$$E = \sum_{i=1}^n E_i \quad \text{Ec. 3}$$

A continuación, se procedió a identificar los 30 minutos de mayor intensidad del evento erosivo seleccionado, y con base en dicha información, se sumaron los valores de precipitación correspondientes a esa media hora. El valor total obtenido se multiplicó por dos para obtener el valor de  $I_{30}$  en mm por hora.

Finalmente, se efectuó el producto entre la energía cinética total (E) y el valor de  $I_{30}$  calculado en el paso anterior, a partir de lo cual se calculó la erosividad total del evento de precipitación considerado; el

factor R se determinó a partir de la sumatoria de la erosividad de cada uno de los eventos considerados en el año y se generó un valor medio de los años considerados para cada estación.

Los valores de  $EI_{30}$  obtenidos se clasificaron según los rangos propuestos por Rivera y Gómez (1991), tal como se pueden apreciar en la Tabla 1.

**Factor R: Método de correlación  $EI_{30\text{cor}}$ .** La metodología propuesta por Ramírez-Ortiz *et al.* (2007) permite estimar el factor R a partir del IMF basado en una ecuación validada para las condiciones pluviométricas de la zona cafetera central del departamento de Caldas. Para efectos de este estudio, se ha definido como  $EI_{30\text{cor}}$ .

Tabla 1. Clasificación de la erosividad de la lluvia

Clase	Erosividad R (Mj.mm.ha <sup>-1</sup> )	Clasificación
1	< 1.000	Natural
2	1.000-2.500	Muy baja
3	2.500-5.000	Baja
4	5.000-7.500	Moderada
5	7.500-10.000	Alta
6	10.000-15.000	Muy alta
7	15.000-20.000	Severa
8	> 20.000	Extremadamente severa

Fuente: Rivera y Gómez (1991).

$$EI_{30cor} = \sum_1^{12} 38,4 (IMF) + 28,3 \quad \text{Ec. 4}$$

En este caso, nuevamente los valores de R obtenidos fueron clasificados de acuerdo con los rangos propuestos por Rivera y Gómez (1991).

Índice de Fournier (IF-anual). Para la estimación de este índice se utilizaron los registros de las estaciones convencionales. El cálculo del IF se fundamentó en la siguiente ecuación:

$$IF = \frac{p^2}{P} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

p: precipitación del mes más lluvioso [mm]

P: Precipitación total anual [mm]

Los IF obtenidos se clasificaron según con la escala valorativa propuesta por Delgado (2003) para áreas montañosas tropicales (Tabla 2).

Índice Modificado de Fournier (IMF-anual). Para la determinación del IMF se utilizaron los registros de las estaciones convencionales.

$$IMF = \sum_1^{12} \frac{p_i^2}{P} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde  $p_i$  es la precipitación mensual del mes "i" y va de enero a diciembre del año correspondiente.

Los valores de IMF resultantes se clasificaron según los rangos propuestos por Lobo *et al.* (2006), como se muestra en la Tabla 3.

**Zonificación de los índices de erosividad.** Las zonificaciones del IMF, el  $EI_{30}$ -USLE y la precipitación media anual, se efectuaron empleando el software QGIS versión 3.6. Una vez obtenidos los *shapes* relacionados con las diferentes variables, se procedió a realizar una interpolación a través del uso del método determinístico del inverso de la distancia ponderada (IDW).

**Tabla 2.** Valores de referencia del Índice de Fournier (IF) para áreas montañosas tropicales

IF	Calificación
< 15	Muy bajo
16-30	Bajo
31-50	Moderado
51-65	Alto
> 65	Muy alto

Fuente: Delgado (2003).

La selección del método se realizó teniendo en cuenta que el IDW se trata de un algoritmo simple que está diseñado para disminuir la distorsión de la interpolación de la superficie determinada (Riquelme *et al.*, 2008), el cual es ampliamente utilizado en la predicción climática y el desarrollo cartográfico (Núñez, 2014; Serrano *et al.*, 2003). Por otra parte, cuando se interpolan valores de precipitación media anual, no es recomendable emplear metodologías que suavicen exageradamente la superficie resultante, como por ejemplo Kriging debido a que se perderían los valores extremos, los cuales presentan gran interés en el análisis y además en algunos casos puede llegar a representar una sobreestimación de los resultados (Vargas *et al.*, 2011 por lo que para este caso la metodología con el mejor ajuste fue IDW.

**Análisis estadístico.** Para determinar las relaciones entre el IF, el IMF, el  $EI_{30}$ -USLE y la precipitación media, se llevaron a cabo análisis de regresiones lineales simples. Así mismo, para establecer la relación entre el factor  $EI_{30}$ -USLE y el IMF, se evaluaron los coeficientes de correlación de Pearson, con un nivel de significancia del 5 %; este análisis se efectuó de manera mensual, según lo sugerido por Ramírez-Ortiz *et al.* (2007), trimestral y, posteriormente, anual. Los análisis estadísticos fueron realizados mediante el programa MINITAB 2017.

## Resultados y discusión

**Distribución temporal (régimen) de las precipitaciones.** De acuerdo con la Figura 3, se aprecia que el comportamiento de la precipitación mensual multianual de las estaciones del área de estudio, presentan un régimen bimodal, donde se evidencian dos períodos húmedos correspondientes a los meses de marzo-mayo y octubre-diciembre.

De este modo, el 66 % de las precipitaciones del año se acumulan en los meses considerados como los más lluviosos y, el 34 % restante, se distribuye en los otros meses, siendo agosto el mes con menor porcentaje (4 %). Así mismo, se encontró que el promedio trimestral marzo-mayo fue de 120 mm, mientras que el de octubre-diciembre fue de 129 mm. El resto del año corresponde a un período de menor precipitación, con registros que oscilan entre los 44.5 mm y los 85 mm.

**Tabla 3.** Clasificación del IMF para América Latina

Clase	IF	Calificación
1	< 60	Muy baja
2	60-90	Baja
3	90-120	Moderada
4	120-160	Alta
5	> 160	Muy alta

Fuente: Lobo, *et al.* (2006).

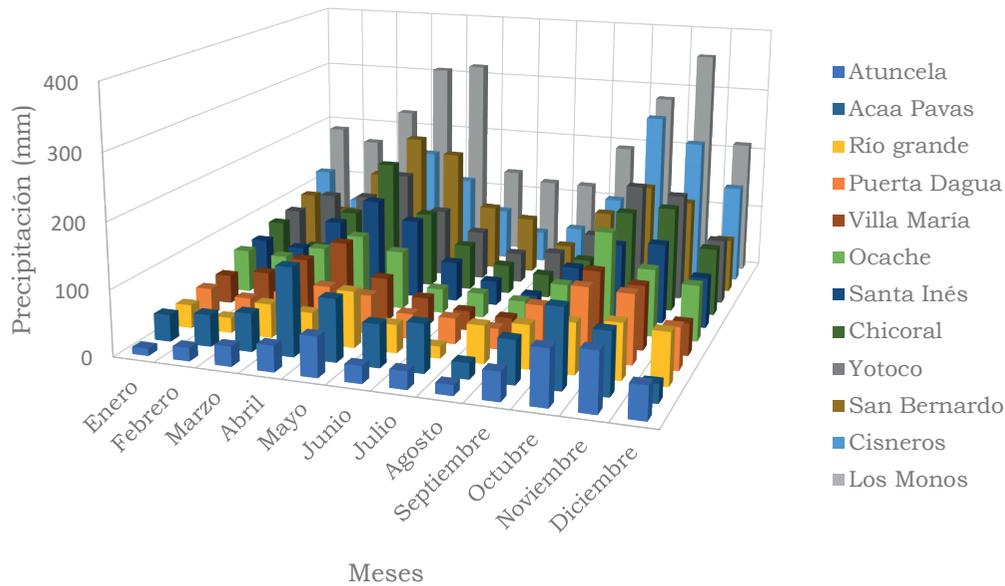


Figura 3. Distribución mensual multianual de las precipitaciones ocurridas en el área de estudio.

Índices de erosividad y factor R. Se analizaron un total de 636 eventos erosivos para determinar el factor  $EI_{30}$ -USLE, de los cuales se obtuvieron 143 eventos mensuales, utilizados para los cálculos de los IF, IMF y el factor  $EI_{30Cor}$ .

**Factores de erosividad (R).** En la Tabla 4 se presentan los resultados de las estimaciones de los factores de erosividad de la lluvia, obtenidos con los diferentes métodos aplicados a los registros pluviométricos de las 12 estaciones automáticas consideradas en el estudio. Estos valores son el resultado del promedio anual para un período de 5 años (2015-2019).

Los resultados muestran que la erosividad de la lluvia y la precipitación anual presentan una relación directamente proporcional. Por su parte, Ramírez *et al.* (2007) reportaron una relación similar entre estas dos variables en un estudio desarrollado para la zona cafetera central y occidental del departamento de Caldas. En este sentido, los valores de erosividad más altos se presentaron en los sectores con mayor precipitación media anual (máxima de 2757.6 mm en la estación Los Monos y los más bajos en la zona con menor precipitación media anual (mínima de 505.60 mm en la estación Atuncela).

Tabla 4. Factores de erosividad de la lluvia en estaciones automáticas en los municipios estudiados

Municipio	Estaciones	Altura (m s.n.m.)	Precipitación media anual (mm)	USLE- $EI_{30}$ ( $MJ^*mm^*ha^{-130}año^{-1}$ )	Clasificación	$EI_{30Cor}$ ( $MJ^*mm^*ha^{-1}año^{-1}$ )	Clasificación
Dagua	Atuncela	813.36	505.6	636.7	Natural	2850.5	Baja
	Puerta Dagua	731	744.6	1561.9	Muy baja	3663.4	Baja
	Los Monos	214.48	2757.6	4384.0	Baja	11110.7	Muy alta
	Río Grande	703	663.8	1656.4	Muy baja	3278.4	Baja
	Cisneros	373	1556.6	3207.4	Baja	7526.5	Alta
	San Bernardo	1897.85	1543.0	2780.2	Baja	6713.1	Moderada
La Cumbre	Ocache	1490	756.0	2543.6	Baja	5629.2	Moderada
	Santa Inés	1550	1064.1	2377.8	Muy baja	4878.7	Baja
	Chicoral	1868.24	1305.9	3387.2	Baja	6398.2	Moderada
Vijes	Acaa Pavas	1591	609.4	1132.1	Muy baja	3696.5	Baja
	Villa María	1698	715.1	1148.2	Muy baja	3735.4	Baja
Yotoco	Bosque de Yotoco	1700	877.3	1918.1	Muy baja	4505.9	Baja

Por otra parte el análisis de los diferentes factores de erosividad evaluados indican que, para el caso USLE- $EI_{30}$ , según la escala propuesta por Rivera y Gómez (1991), el valor más alto (4384.0 MJ\*mm/ha-año) corresponde a una categoría de erosividad baja y, el valor más bajo (636.7 MJ\*mm/ha-año), a una categoría de erosividad natural. Por su parte, el  $EI_{30cor}$  muestra una categorización de erosividad “muy alta” para el mayor valor obtenido (11110.7 MJ\*mm/ha-año), mientras que para el valor más bajo (2850.5 MJ\*mm/ha-año) corresponde a una clasificación baja.

De acuerdo con lo anterior, es posible que, para las condiciones del área de estudio, el factor  $EI_{30cor}$  esté incurriendo en una posible sobreestimación de los resultados, por lo que es necesario efectuar un ajuste al modelo, teniendo en cuenta que este factor fue propuesto a partir de una regresión lineal entre el IMF y la metodología USLE- $EI_{30}$ .

Con respecto a la distribución temporal de la erosividad de la lluvia ( $EI_{30}$ -USLE), durante el lapso evaluado (años 2015-2019), se encontró que el 34 % de los eventos erosivos ocurrieron durante el período comprendido entre los meses marzo-mayo que corresponden al 31.87 % de la precipitación media mensual multianual y, el otro 35 %, durante los meses de septiembre a noviembre que corresponde al 33.6 % de la precipitación media mensual multianual, respondiendo al régimen bimodal. Durante el mes de octubre se registró el mayor potencial erosivo, con una concentración del 14 % de la erosividad anual, y el 12.85 % de la precipitación media mensual multianual (Figura 4).

Índices de erosividad. En términos generales, el comportamiento de los IF e IMF fue similar, encontrándose que, para ambos casos, los valores

más altos se presentaron en la estación los monos con valores de 77.29 y 280.8, respectivamente, mientras que el valor más bajo se obtuvo para la estación de Atuncela con valores de 18.20 y 66.1, respectivamente.

Sin embargo, al realizar una comparación más minuciosa entre estos dos índices, se evidenció que existen dos estaciones (San Bernardo y Ocache) con diferencias a nivel clasificatorio, las cuales mostraron valores moderados para el caso del IF, y valores muy alto y alto respectivamente, para el caso del IMF.

De manera similar a lo observado para los factores de erosividad, analizados en el apartado anterior, se encontró que los IF e IMF exhiben una relación directa con la precipitación anual en las estaciones evaluadas. La Tabla 5 presenta los resultados obtenidos para los índices de erosividad.

El análisis de regresión lineal entre los IF, los IMF y la precipitación media anual, permitió corroborar que el IMF presenta un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) más alto (0.976) que el presentado por el IF (0.799) (Figura 5), coincidiendo con lo planteado por Kraemer *et al.* (2018).

En este sentido, se considera que el IMF es un buen estimador de la agresividad de las lluvias para el modelamiento de procesos erosivos en el área de estudio, lo cual es respaldado por Hoyos *et al.* (2005), Ramírez-Ortiz *et al.* (2007) y Rutebuka *et al.* (2020), quienes señalan que este índice es adecuado para emplearse en zonas tropicales. Lo anterior, teniendo en cuenta que el IMF relaciona la sumatoria de los cuadrados de todas las precipitaciones mensuales con la precipitación media anual, mientras que el IF considera en su ecuación, solo a la precipitación del mes más lluvioso, por lo que estaría subestimando los resultados, tal como lo afirman González *et al.* (2018).

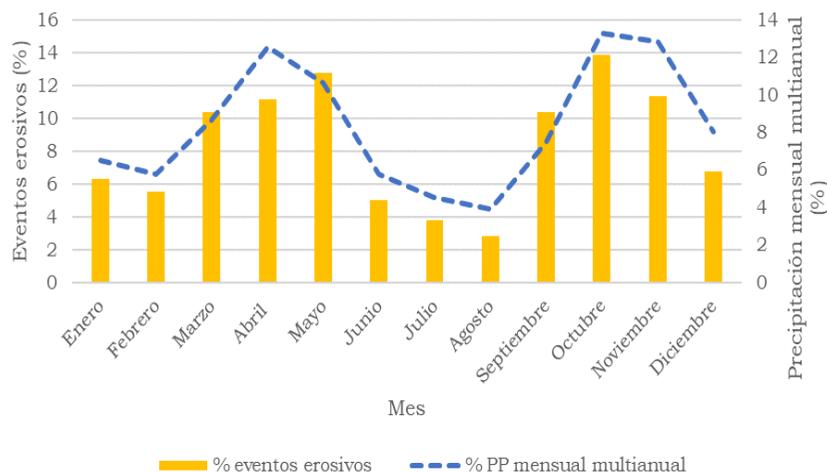
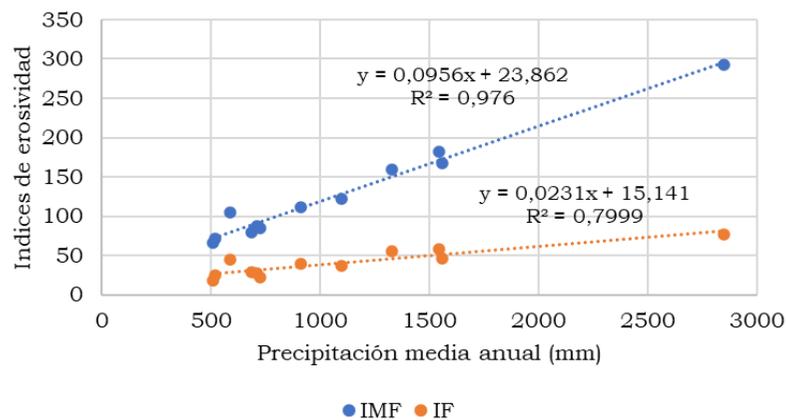


Figura 4. Distribución anual de eventos erosivos y precipitación mensual multianual en los municipios estudiados.

**Tabla 5.** Índices de erosividad de la lluvia en estaciones automáticas en los municipios estudiados

Municipio	Estaciones	Altura (m s.n.m.)	Precipitación media anual (mm)	IF	Clasificación	IMF	Clasificación
Dagua	Atuncela	813.36	505.6	18.20	Bajo	66.1	Bajo
	Puerta Dagua	731	744.6	22.77	Bajo	86.6	Bajo
	Los Monos	214.48	2757.6	77.29	Muy alto	280.8	Muy alto
	Río Grande	703	663.8	29.12	Bajo	76.8	Bajo
	Cisneros	373	1556.6	58.80	Alto	187.3	Muy alto
	San Bernardo	1897.85	1543.0	46.45	Moderado	166.0	Muy alto
La Cumbre	Ocache	1490	756.0	44.78	Moderado	137.8	Alto
	Santa Inés	1550	1064.1	36.66	Moderado	118.4	Moderado
	Chicoral	1868.24	1305.9	56.10	Alto	157.9	Alto
Vijes	Acaa Pavas	1591	609.4	25.43	Bajo	87.8	Bajo
Vijes	Villa María	1698	715.1	28.09	Bajo	88.6	Bajo
Yotoco	Bosque de Yotoco	1700	877.3	39.41	Moderado	108.9	Moderado

**Figura 5.** Relación entre el IF, el IMF y la precipitación media anual de los municipios estudiados.

Por otra parte, Echeverri y Obando (2010) afirman que, para usar el índice de Fournier como un indicador de la capacidad erosiva de las lluvias, es muy importante considerar que en aquellas áreas donde el régimen pluviométrico tiene más de un pico mensual, o en donde los valores son generalmente altos, solo se toma en cuenta al mes de mayor precipitación, por lo que el resto de los meses no se incluyen. Por tal motivo, no es recomendable utilizar este índice para áreas como la del Valle del Cauca, cuyo régimen pluviométrico es de tipo bimodal.

**Erosividad estimada a partir del  $EI_{30}$  - USLE y el IMF.** Teniendo en cuenta las limitaciones de acceso a la información de intensidad de lluvias para el cálculo del factor R, se realizó un análisis para abordar su relación con variables de fácil obtención como el IMF y las precipitaciones medias anuales. En ambos casos, el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) alcanzado fue elevado, sin embargo, la predicción del  $EI_{30}$  a partir del IMF presentó un valor de  $R^2$  (0.893) superior al obtenido con la precipitación media anual (0.822), por lo que se decidió trabajar con base en el IMF.

Además, a partir del análisis estadístico fue posible determinar que con un nivel de significancia del 0.05, el IMF anual explica mejor la variación del  $EI_{30}$ -USLE anual ( $r = 0.95$ ,  $R^2 = 0.89$ ), en comparación con el mensual ( $r = 0.72$ ,  $R^2 = 0.49$ ), lo que valida la utilización del IMF anual para obtener una aproximación del  $EI_{30}$ -USLE, cuando no se cuenta con registros de precipitación tan detallados.

Las Figuras 6 y 7 presentan los resultados de la relación entre el  $EI_{30}$  - USLE y el IMF mensual y anual.

De acuerdo con lo anterior, mediante el análisis de regresión lineal se obtuvo el siguiente modelo:

$$EI_{30} = 20.979 (\text{IFM}) - 389.04 \quad (\text{Ec.7})$$

Donde:

$$EI_{30} = \text{Erosividad anual (Factor R)}$$

$$\text{IMF} = \text{Índice modificado de Fournier (anual)}$$

**Zonificación de la erosividad de la lluvia para los cuatro principales municipios productores de piña del departamento del Valle del Cauca.** El análisis

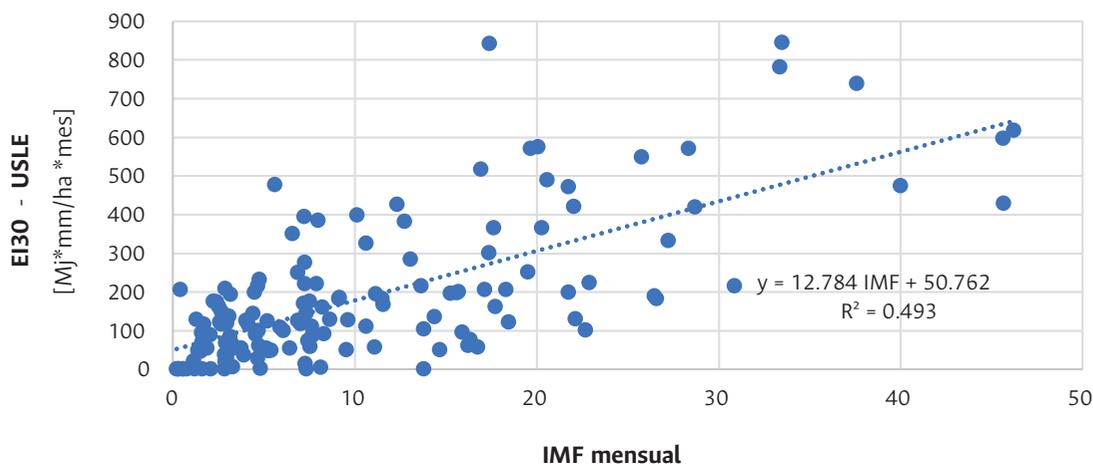


Figura 6. Relación entre el IMF mensual y el  $EI_{30}$ -USLE de los municipios correspondientes al área de estudio.

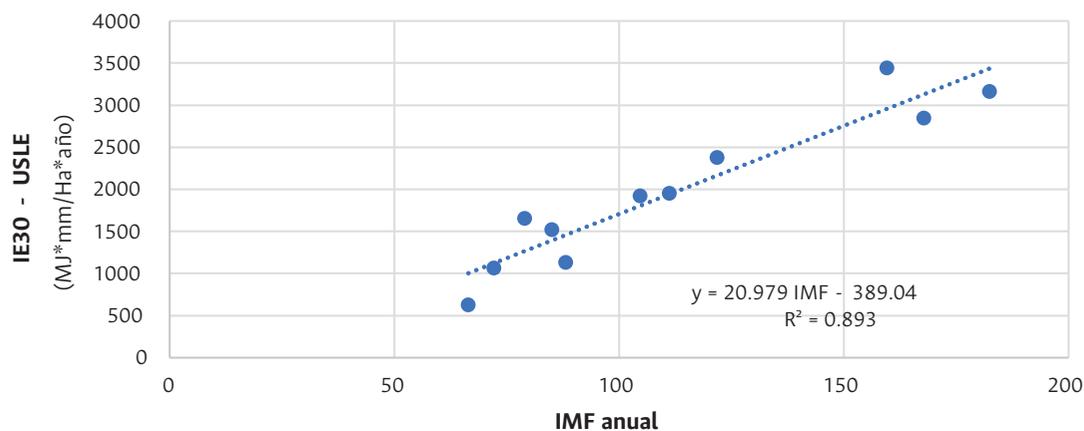


Figura 7. Relación entre el IMF anual y el  $EI_{30}$ -USLE de los municipios correspondientes al área de estudio.

y la zonificación de los datos de precipitación media anual, mostraron que los valores más altos (1800 mm - 2800 mm) cubren aproximadamente un 3 % del total del área de estudio, abarcando un pequeño sector correspondiente al municipio Dagua. Mientras que el resto del área, representada por los municipios Restrepo, Vijes y La Cumbre, registran precipitaciones promedios anuales entre 500 mm y 1000 mm, cuyos montos representan más del 94 %, 87 % y 77 % de superficie, respectivamente. La Figura 8 muestra la distribución espacial de la precipitación media anual en el área de estudio.

Respecto a la distribución de los valores de erosividad, se observó que en el área existe una relación evidente entre el IMF y el  $EI_{30}$ -USLE. Los valores más altos del IMF se registraron para el municipio Dagua, presentando una categoría de Moderado a Alto (valores entre 90 y 160), lo que equivale al

80 % del municipio (54.5 % alto y 24.5 % moderado). Mientras que, los valores más bajos, se presentaron en los municipios Restrepo, Vijes y La Cumbre, con una categoría de Moderado, equivalentes a más del 90 %, 81 % y 74 % de la superficie total del área de estudio, respectivamente (Figura 9).

Con relación al factor  $EI_{30}$ -USLE, se encontró que en el 72.3 % del área de estudio la erosividad es muy baja (entre 1000 MJ.mm.ha<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y 2500 MJ.mm.ha<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>), lo cual es acorde con los valores de precipitación más representativos del mismo (800-1400 mm). En el 27.5 % de área restante, la erosividad clasificó como baja (2500 MJ.mm.ha<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>-5000 MJ.mm.ha<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>), y solo el 0.2 % del área clasificó como erosividad Natural, según la clasificación de Rivera y Gómez (1991) (Figura 10).

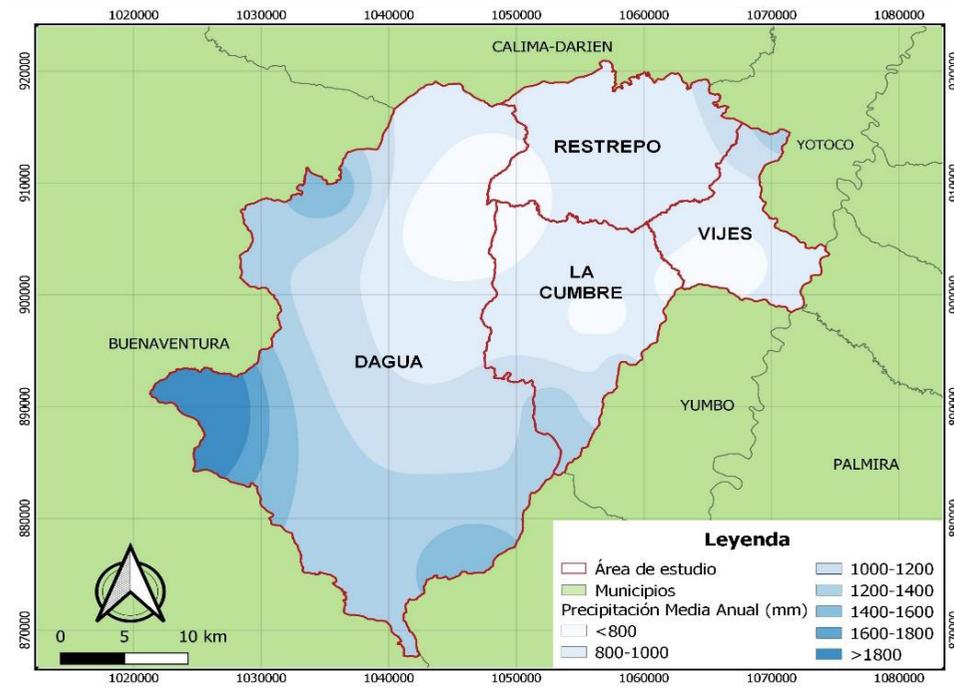


Figura 8. Distribución espacial de la precipitación media anual de los municipios estudiados.

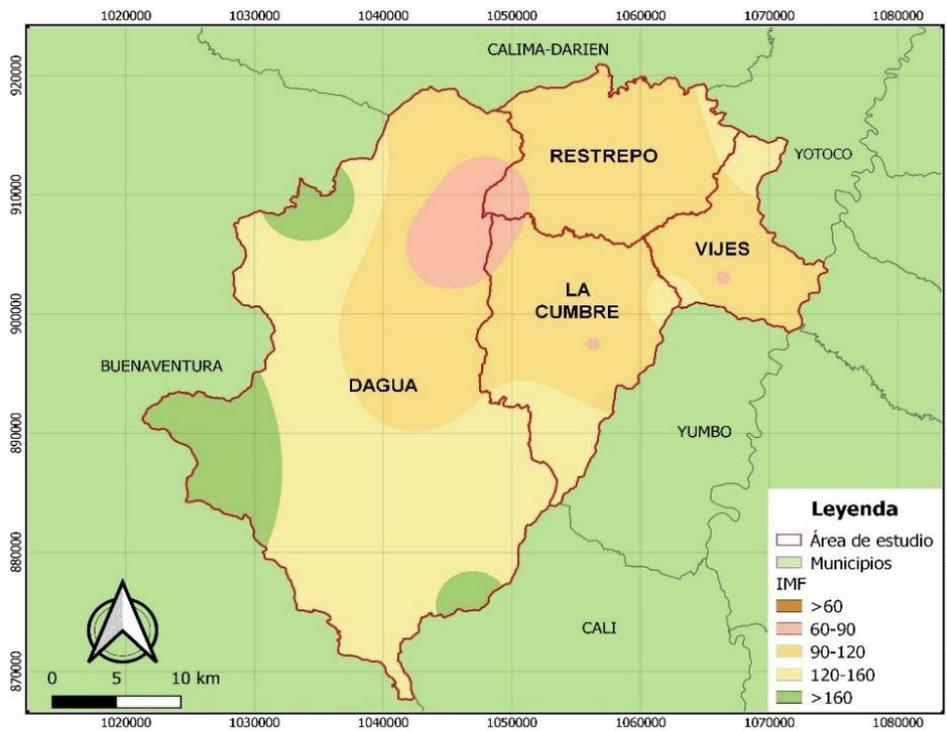


Figura 9. Distribución espacial del IMF en los municipios estudiados.

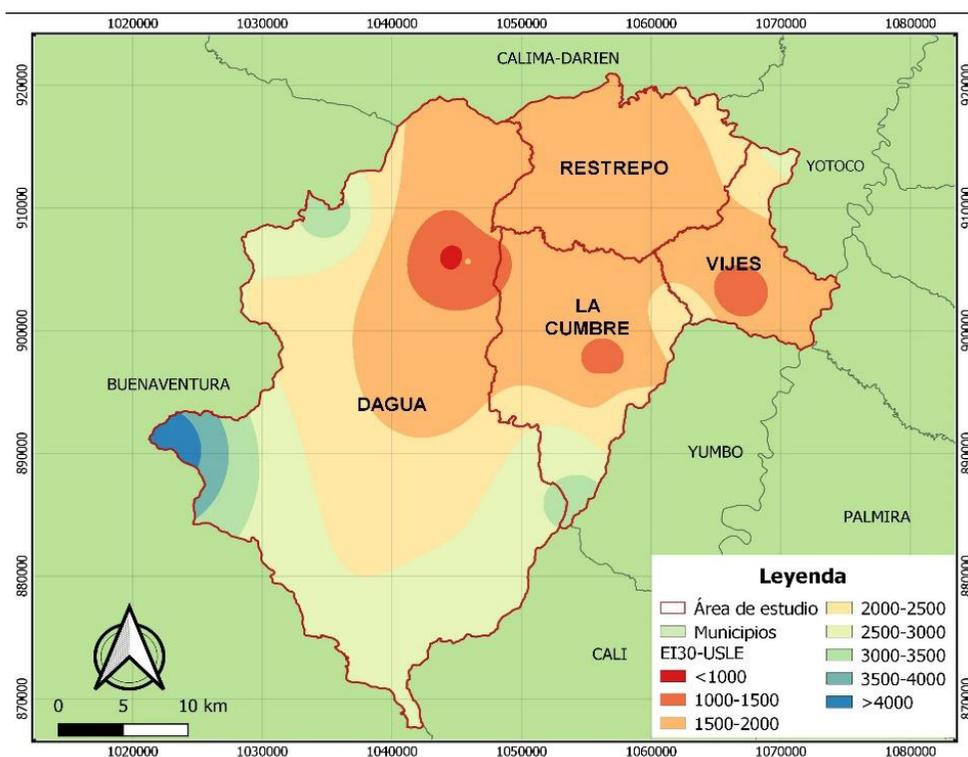


Figura 10. Distribución espacial del  $EI_{30}$ -USLE en los municipios estudiados.

## Conclusiones

Las precipitaciones en la región del Valle del Cauca donde se encuentran los principales municipios productores de piña tienen bajo potencial erosivo, sin embargo, se encontraron valores de erosividad alta y muy alta en el municipio de Dagua, ocupando aproximadamente un 3 % del área de estudio.

El IMF es un buen índice para la estimación y el conocimiento de la distribución general de los valores de la erosividad. El modelo ajustado ( $EI_{30} = 20.979$  (IFM) - 389.04;  $R^2 = 0.89$ ) podría ser utilizado para estimar la erosividad de las lluvias anuales a nivel del área de estudio ante la ausencia de datos pluviográficos.

Es necesario considerar que la erosión del suelo depende de otros factores como la erodabilidad, el factor topográfico, las coberturas y prácticas de conservación, por lo tanto, es importante conducir nuevas investigaciones que permitan determinar los efectos potenciales de estas variables que puedan conllevar a la erosión y aparición de cárcavas, muchas de las cuales ya se han reportado en la zona de estudio.

Es importante para trabajos futuros determinar el factor R a nivel local, incorporando un mayor número de estaciones y periodos históricos superiores a los analizados, sin embargo, se considera que la información generada en la presente investigación

contribuye con elementos útiles para el desarrollo de estrategias de manejo y conservación de suelo, que permitan disminuir y mitigar los procesos por erosión hídrica de la región.

## Referencias

- Aguirre M.A., López L.I., Bolaños F.V., González D.F. y Buitrago O.B. (2017). Percepción del paisaje, agua y ecosistemas en la cuenca del río Dagua, Valle del Cauca, Colombia. *Perspectiva Geográfica*, 22(1), 109-126.
- Arnoldus, H.M.J. (1977). Methodology Used to Determine the Maximum Potential Range Average Annual Soil Loss to Sheet and Rill Erosion in Morocco. *Assessing Soil Degradation*, FAO Soils Bulletin (FAO), 34, 39-48.
- Arnoldus, H.M.J. (1980). An Approximation of the Rainfall Factor in the Universal Soil Loss Equation. En M. de Boedt, D. Gabriels (Eds.), *Assessment of Erosion* (pp. 127-132). John Wiley and Sons.
- Benaud, P., Anderson, K., Evans, M., Farrow, L., Glendell, M., James, M.R., Quine, T.A., Quinton, J.N., ... Brazier, R.E. (2020). National-scale geodata describe widespread accelerated soil erosion. *Geoderma*, 371. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114378>
- Bezák, N., Ballabio, C., Mikoš, M., Petan, S., Borrelli, P. y Panagos, P. (2020). Reconstruction of past rainfall erosivity and trend detection based on the REDES database and reanalysis rainfall. *Journal of Hydrology*, 590. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125372>
- Bi, N., Wang, H. y Yang, Z. (2014). Recent changes in the erosion-accretion patterns of the active Huanghe (Yellow River) delta

- lobe caused by human activities. *Continental Shelf Research*, 90, 70-78. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2014.02.014>
- Castelan Vega, R., Tamariz Flores, V., Linares Fleites, G. y Cruz Montalvo, A. (2014). Agresividad de las precipitaciones en la subcuenca del río San Marcos, Puebla, México. *Investigaciones Geográficas*, (83), 28-40. <https://doi.org/10.14350/ig.33480>
- Castro Quintero, A.F., Lince Salazar, L.A. y Riaño Melo, O. (2017). Determinación del riesgo a la erosión potencial hídrica en la zona cafetera del Quindío, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental (RIAA)*, 8(1), 17-26. <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/1828>
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). (2014). Levantamiento semidetallado de suelos escala 1:25.000 de las cuencas priorizadas por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca-CVC-Convenio interadministrativo 4888 IGAC-087 CVC de 2014. ECOPELIA. <https://bit.ly/3oO1wGO>
- Chen, Y., Xu, M., Wang, Z., Chen, W. y Lai, C. (2020). Reexamination of the Xie model and spatiotemporal variability in rainfall erosivity in mainland China from 1960 to 2018. *Catena*, 195. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104837>
- Delgado, E.F. (2003). *Un protocolo para apoyar la selección de prácticas de conservación de suelos en tierras montañosas tropicales*. I Seminario Internacional de Agricultura de Conservación en Tierras de Ladera, Manizales, Colombia.
- Echeverri, L. y Obando, F.H. (2010). Erosividad de las lluvias en la región centro-sur del Departamento de Caldas, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 63(1), 5307-5318. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0304-28472010000100009&lng=e&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0304-28472010000100009&lng=e&nrm=iso&tlng=es)
- Evans, R. y Boardman, J. (2016). The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy*, 54, 438-447. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.12.013>
- Fernández, H., Martins, F. e Isidoro, J.M.G.P. (2020). Mapping rainfall aggressiveness from physiographical data: application to the Grândola Mountain Range (Alentejo, Portugal). *Physical Geography*, 41(5), 451-466. <https://doi.org/10.1080/02723646.2019.1674557>
- Fournier, F. (1960). *Climat et érosion; la relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmospherique*. Paris, France: Presses Universitaires de France.
- Gómez, A. (1975). Sistema IUM para determinación del uso y manejo de los suelos de ladera. *Cenicafé*, 26(2), 72-86. <http://hdl.handle.net/10778/682>
- Gómez, F.E. (1991). El potencial de erosión pluvial por período decadal y su manejo conservacionista-zona suroccidental del departamento de Antioquia (Metodología de Fournier). *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 10, 1-21.
- González, S., Carfagno, P. y Eiza, M.J. (2018). Indicadores del potencial erosivo de las precipitaciones, calculado a través de diferentes metodologías. *Revista de la Facultad de Agronomía y Ciencias Agroalimentarias UM*, 9, 43-64. [https://www.unimoron.edu.ar/static/media/doc\\_88549546942c11e9ad5808002797af99\\_o.pdf](https://www.unimoron.edu.ar/static/media/doc_88549546942c11e9ad5808002797af99_o.pdf)
- Guo, B., Luo, W., Han, B., Liu, Y., Yang, F., Fan, Y., ... Sun, G. (2019). Multiple spatial-temporal scale change patterns of rainfall erosivity in China over past 58 years based on gravity centre model. *Geomatics Natural Hazards and Risk*, 10, 2200-2219.
- Guo, L., Liu, R., Men, C., Wang, Q., Miao, Y., Shoaib, M., ... Zhang, Y. (2021). Multiscale spatiotemporal characteristics of landscape patterns, hotspots, and influencing factors for soil erosion. *Science of the Total Environment*, 779. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146474>
- Hoyos, N., Waylen, P.R. y Jaramillo, A. (2005). Seasonal and spatial patterns of erosivity in a tropical watershed of the Colombian Andes. *Journal of Hydrology*, 314(1-4), 177-191. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.03.014>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), U.D.C.A. (2015). Síntesis del estudio nacional de la degradación de suelos por erosión en Colombia-2015. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023648/Sintesis.pdf>
- Jordán, A. y Bellinfante, N. (2000). Cartografía de la erosividad de la lluvia estimada a partir de registros pluviométricos mensuales en el Campo de Gibraltar (Cádiz). *Edafología*, 7(3), 83-92.
- Kaiser, A., Erhardt, A. y Eltner, A. (2018). Addressing uncertainties in interpreting soil surface changes by multitemporal high-resolution topography data across scales. *Land Degradation and development*, 29(8), 2264-2277.
- Kraemer Behrends, F., Chagas, C.I., Ibañez, L., Carfagno, P. y Vangeli, S. (2018). Análisis de la erosividad de las lluvias para el partido de San Pedro (Bs. As.). *Ciencia del suelo*, 36(1), 124-137. <https://bit.ly/3qSZzvv>
- Kumarasinghe, U. (2021). A review on new technologies in soil erosion management. *Journal of research technology and engineering*, 2(1), 120-127.
- Li, J., Wang, Z. y Lai, C. (2020). Severe drought events inducing large decrease of net primary productivity in mainland China during 1982-2015. *Science of the Total Environment*, 703. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135541>
- Loaiza, W., Carvajal, Y. y Ávila, J.A. (2014). Agroecological evaluation of agricultural production systems in the Centella watershed (Dagua, Colombia). *Colombia Forestal*, 17(2), 161-179.
- Lobo, D. (Coord.) (2006). *Guía metodológica para la elaboración del mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas de América Latina y el Caribe*. UNESCO. <https://bit.ly/3qQVV5m>
- Méndez, W., Pacheco, H., Landaeta, L., Menéndez, E., Pérez, M., Parra, G. y Fuentes, J. (2020). Indicadores de erosividad de la lluvia en una cuenca de la Serranía del Litoral Central de Venezuela. *Revista de Geografía Norte Grande*, (76), 279-301. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022020000200279>
- Mohtar, Z.A., Yahaya, A.S. y Ahmad, F. (2015). Rainfall Erosivity Estimation for Northern and Southern Peninsular Malaysia using Fournier Indexes. *Procedia Engineering*, 125, 179-184. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.026>
- Moore, T.R. (1979). Rainfall erosivity in East Africa. *Geografiska Annaler*, 61(3-4), 147-156. <https://doi.org/10.2307/520909>
- Núñez, D., Treviño, E. J., Reyes, V. M., Muñoz, C. A., Aguirre, O. A. y Jiménez, J. (2014). Uso de modelos de regresión para interpolar espacialmente la precipitación media mensual en la cuenca del río Conchos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(2), 201-213.
- Panagos, P., Ballabio, C., Borrelli, P. y Meusburger, K. (2016). Spatio-temporal analysis of rainfall erosivity and erosivity density in Greece. *Catena*, 137, 161-172.
- Pereira Cardoso, D., Silva, E.M., Avanzi, J.C., Muniz, J.A., Furtado Ferreira, D., Naves Silva, M.L., Acuña-Guzmán, S.F. y Curi, N. (2020). Rainfall Erosivity Factor: An R package for rainfall erosivity (R-factor) determination. *Catena*, 189. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104509>

- Poesen, J. (2018). Soil erosion in the Anthropocene: Research needs. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(1), 64-84. <https://doi.org/10.1002/esp.4250>
- Qin, W., Guo, Q., Zuo, C., Shan, Z., Ma, L. y Sun, G. (2016). Spatial distribution and temporal trends of rainfall erosivity in mainland China for 1951–2010. *Catena*, 147, 177-186. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.07.006>
- Ramírez-Ortiz, F.A., Hincapié-Gómez, E., Sadeghian-Khalajabadi, S. y Pérez-Gómez, U. (2007). Erosividad de las lluvias en la zona cafetera central y occidental del departamento de Caldas. *Cenicafé*, 58(1), 40-52. <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc058%2801%29040-052.pdf>
- Ramírez-Ortiz, F.A e Hincapié Gómez, E. (2009). Riesgo a la erosión en la Zona Cafetera Central del Departamento de Caldas. *Cenicafé*, 60(2), 1-17. [https://www.cenicafe.org/es/publications/arc060\(02\)173-189.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/arc060(02)173-189.pdf)
- Rivera, P.H. y Gómez, A. (1991). Erosividad de las lluvias de la zona cafetera central colombiana (Caldas, Quindío y Risaralda). *Cenicafé*, 42(2), 37-52.
- Rutebuka, J., De Taeye, S., Kagabo, D. y Verdoodt, A. (2020). Calibration and validation of rainfall erosivity estimators for application in Rwanda. *Catena*, 190. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104538>
- Shi, D., Jiang, G., Peng, X., Jin, H. y Jiang, N. (2021). Relationship between the periodicity of soil and water loss and erosion-sensitive periods based on temporal distributions of rainfall erosivity in the Three Gorges Reservoir Region, China. *Catena*, 202. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105268>
- Shin, J-Y., Kim, T., Heo, J-H. y Lee, J-H. (2019). Spatial and temporal variations in rainfall erosivity and erosivity density in South Korea. *Catena*, 176, 125-144. ISSN 0341-8162. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.01.005>
- Vargas, A., Santos, A., Cárdenas, E., Obregón, N. (2011). Análisis de la distribución e interpolación espacial de las lluvias en Bogotá, Colombia. *Dyna*, 78 (167), 151-159.
- Wischmeier, W. y Smith, D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning*. Department of Agriculture, Agriculture handbook.
- Xu, Z., Pan, B., Han, M., Zhu, J. y Tian, L. (2019). Spatial-temporal distribution of rainfall erosivity, erosivity density and correlation with El Niño–Southern Oscillation in the Huaihe River Basin, China. *Ecological Informatics*, 52, 14-25. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2019.04.004>